

УДК 553.495:550.832.7:622.245.01

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБСАДНЫХ КОЛОНН В СКВАЖИНАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Шарапатов Абиш¹,
a.sharapatov@satbayev.university

Асирбек Назерке Асирбеккызы¹,
n.assirbek@stud.satbayev.university

Саманбетов Нурлан Зейноллаевич¹,
n.samanbetov@stud.satbayev.university

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Казахстан, А15М8С4 (050013), г. Алматы, ул. Сатпаева, 22.

Актуальность. При эксплуатации месторождений урана способом подземного скважинного выщелачивания возникает множество проблемных вопросов. Среди них можно выделить нарушение целостности и герметичности полимерной обсадной колонны, что приводит к утечке растворов по дефектам и резьбовым соединениям, кольматации и др. С помощью геофизических исследований скважин, а именно токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления, имеется технологическая возможность получить фактические данные об утечках растворов в околоскважинное пространство (их расположение, величина). Распространение растворов в затрубное пространство приводит к технологическим и геозологическим нарушениям при освоении месторождений.

Цель: сравнительная оценка эффективности токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления при решении технологических задач – оценке целостности полимерных труб и герметичности резьбовых соединений в обсадной колонне урановых скважин и определению параметров ликвидации скважин с поврежденными колоннами на основе данных токового каротажа или каротажа кажущегося электрического сопротивления в обсадке.

Объекты: искусственные дефекты в обсадной колонне для проведения экспериментальных работ: отверстия в трубах с разными диаметрами и расположениями, негерметичные соединения обсадных труб.

Методы и методика. Работа выполнена на одном из участков уранового месторождения Шу-Сарысуской провинции и включает следующие мероприятия: подготовка полимерных обсадных колонн для проведения эксперимента; физико-техническое обоснование применения методов геофизических исследований скважин для изучения проблемы; выполнение измерительных работ методами токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления; проведение вычислительных работ с применением показаний токового каротажа, каротажа кажущегося электрического сопротивления и получение значений вероятностного параметра для оценки состояния обсадных колонн и принятия решения по эксплуатации скважин; сравнительный анализ и составление выводов по информативности скважинных геофизических (электрических) методов.

Результаты. Итоги работы показали, что для решения задачи контроля технического состояния обсадных колонн оптимальным является применение метода каротажа кажущегося электрического сопротивления. Выводы исследований составлены по итогам анализа характера изменения диаграмм электрических методов методами токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления, чувствительности измеряемых значений электрического поля к дефектам в обсадной колонне. Количественные значения параметра % АНО – величина утечки тока (аномалии), полученные расчетным путем по данным методами токового каротажа и самопроизвольной поляризации носят вероятностный характер. Они позволили разработать рекомендации для принятия технологического и/или управленческого решения по состоянию обсадных колонн и дальнейшему использованию эксплуатационных скважин с разными дефектами в них.

Ключевые слова:

Урановые месторождения, целостность и герметичность обсадных колонн, полимерные трубы, токовый каротаж, каротаж кажущегося электрического сопротивления, оптимальный метод ГИС.

Введение

В общем объеме минерально-сырьевой базы Казахстана весомой долей обладают урановые месторождения. В открытых источниках имеются сведения о производстве урана в мире, в том числе в Казахстане [1]. Они в стране разрабатываются с 70-х гг. прошлого века. Самой крупной урановорудной провинцией в масштабе страны является Шу-Сарысуский район. О геологических характеристиках месторождений урана района, включая закономерности их размещения и типы оруденения, опубликованы множество научных трудов отечественных и зарубежных исследователей [2–4]. Самыми технологичными и рентабельными для отработки рудных залежей явля-

ются экзогенные (пластово-инфильтрационного гидрогенного типа) месторождения урана с применением прогрессивного и безопасного способа подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) [5–8].

При изучении месторождений полезных ископаемых особое место отводится геофизическим методам исследования скважин (ГИС) – каротажу, операциям в скважинах и скважинной геофизике [9–11]. На урановых месторождениях роль ГИС связана с 1) сооружением подавляющего большинства скважин без отбора керна и 2) обеспечением безопасности работ в радиационной среде. То есть данные ГИС являются практически единственной информационной поддержкой при решении разведочных, геотехнологиче-

ских и других задач: от литологического расчленения разреза и контроля технического состояния эксплуатируемых скважин до их ликвидации после отработки месторождений [12–15]. Выбор конкретных методов ГИС (электрических, радиометрических и других) и использование их данных на разных этапах изучения и освоения урановых месторождений определяются отраслевыми нормативными документами и инструкциями технического и опытно-методического характера.

Актуальным является вопрос постоянного совершенствования методики выбора оптимального метода ГИС для решения каждой геолого-технологической задачи. Одной из таких задач является контроль за целостностью труб и герметичностью обсадных колонн в урановых скважинах. Важность контроля заключается в том, что он выявляет нарушение геотехнологических процедур и геоэкологических норм при освоении месторождений – утечка растворов в околоскважинное пространство, что вызывает опасность поступления химических веществ в различные горизонты геологического разреза [8, 16–18].

Метод и методика определения информативного электрического метода ГИС

Был проведен тест в опытной гидрогеологической скважине уранового месторождения. На данной скважине при сооружении в целях эксперимента на полимерных обсадных колоннах были просверлены

отверстия различного диаметра, чтобы выявить чувствительность скважинных приборов токового каротажа (ТК) и каротажа кажущегося электрического сопротивления (КС) на имеющихся аномалиях вдоль колонны (рис. 1).

При использовании заранее известных данных были протестированы пять различных конфигураций размещения отверстий:

- **T1** – на данном участке обсадной колонны просверлены отверстия в середине диаметром $\varnothing=1, 2, 3, 5$ и 10 мм. Этим участком трубы обсажен интервал глинистых пород.
- **T2** – на месте соединения данного участка обсадной трубы с другими частями клей не был нанесен.
- **T3** – с четырех противоположных сторон на данном участке обсадной трубы в средней части просверлены отверстия диаметром $\varnothing=1, 3$ и 5 мм, чтобы увеличить контакт с поверхностью между внутренними и внешними обсадными трубами.
- **T4** – просверлены два отверстия с противоположных сторон на расстоянии $1/3$ и $2/3$ на каждой обсадной трубе диаметром $\varnothing=1, 3$ и 5 мм, чтобы проверить влияние расположения скважинного прибора на обсадную колонну.
- **T5** – просверлено одно отверстие на каждой обсадной трубе диаметром $\varnothing=1, 2, 3, 5$ и 10 мм, в средней части на интервале песчаных пород (рис. 1, 2).

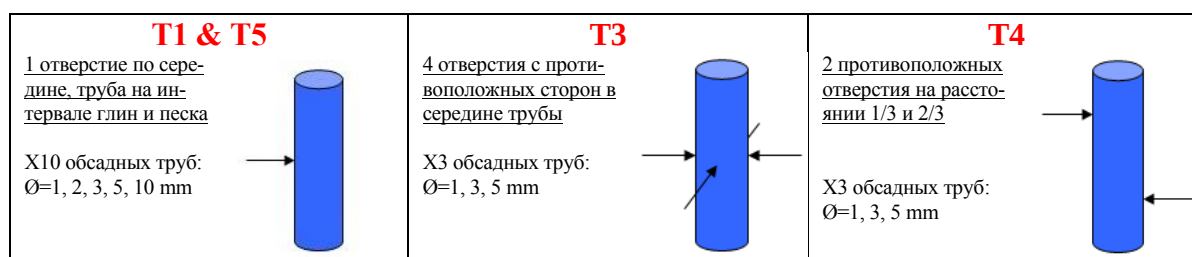


Рис. 1. Место расположения известных отверстий на обсадных трубах

Fig. 1. Location of known holes on casing pipes

В целом информативность геофизических методов определяется их физическими основами, аппаратно-методическими возможностями и/или физико-геологическими условиями геологического разреза: дифференциация значений, соответствующих методу физическим свойствам изучаемых объектов, проявление их в наблюдаемых геофизических полях [19, 20]. В рамках данного исследования при выборе электрических методов ГИС также учитывались физические принципы действия ТК, КС и производственный опыт рабочей группы.

При исследовании разрезов скважин с одноэлектродной установкой методом регистрации тока горные породы изучаются по данным измерения полного сопротивления заземления питающего электрода А (R_A), путем измерения силы тока (I), проходящего через это заземление и находящегося в обратной зависимости от сопротивления заземления R_A .

В однородном безграничном пространстве (при отсутствии контактного сопротивления) сопротивле-

ние заземления R пропорционально удельному электрическому сопротивлению ρ среды, в которой находится заземление, и зависит от его размеров и формы.

Электропроводность полимерных обсадных труб на несколько порядков ниже электропроводности горных пород, составляющих геологический разрез скважин. Именно этим обстоятельством и определяется то, что места нарушения гидроизоляции и фильтровая часть колонны обсадных труб на диаграммах токового каротажа отмечаются контрастными аномалиями изменения тока в цепи АВ.

Физическими предпосылками подобного рода исследований служит то, что полимерная труба является хорошим изолятором и любая электролитическая связь между жидкостью внутри обсадной колонны и поровой жидкостью горной породы вне её может свидетельствовать о нарушении целостности обсадной колонны. По сути, и токовый каротаж и КС в обсадке фиксируют изменение сопротивления в зоне подвижного электрода.

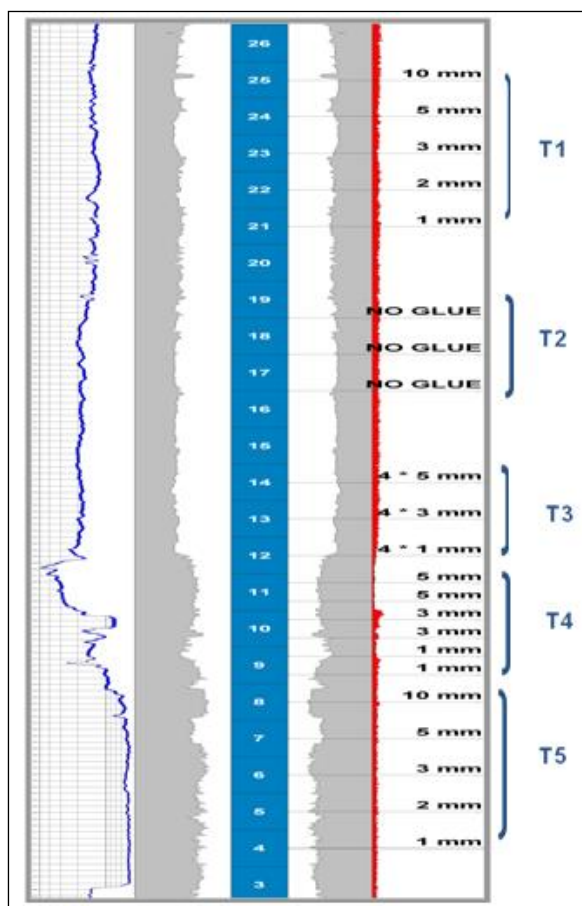


Рис. 2. Место расположения известных отверстий на обсадных трубах в скважине (конструкция скважины: синим цветом в центре указана обсадная колонна; слева – диаграмма КС, потенциал-зонд)

Fig. 2. Location of the known holes on the column pipes in the well (well design: casing is indicated in blue in the center; on the left – resistivity logging (RL) diagram, potential-probe)

КС в обсадке выполняют специально изготовленным малым электрозондом типа (A0,1M0,1N) с целью локализации места нарушения. Форма аномалии от порыва колонны на диаграмме будет отображена увеличением тока на диаграмме ТК и минимумом сопротивления на диаграммах КС. При всей своей простоте интерпретация полученных диаграмм является неоднозначной. Если определение положения крупных нарушений обсадной колонны, какими, например является фильтр, сомнений не вызывают, то мелкие аномалии (менее 20 % от максимальной амплитуды) всегда склоняют к размышлениям.

Исходя из вышепредставленных материалов использованы следующие параметры, которые могут быть основанием для ликвидации скважины по результатам каротажа методом КС в обсадке или ТК.

В ходе расчета использовался обычный метод калькуляции:

$$\%ANO = \frac{[Max(ANO) - Bckgr]}{[Max(Screen) - Bckgr]} \cdot 100 \%,$$

где % ANO – величина утечки тока (аномалии); $Max(ANO)$ – максимальное значение утечки тока (аномалии); $Max(Screen)$ – максимальное значение в интервале фильтра; $Bckgr$ – среднее фоновое значение.

Результаты

В ходе эксперимента при проведении каротажа методом КС в обсадке были получены следующие результаты: на обсадных трубах **T1–T5** на отверстиях с диаметром от 3 до 10 мм утечки тока обнаруживались систематически, отверстия диаметром от 1 до 2 мм зачастую не записывались как аномалия, что зависело от калибровки прибора, но проявлялись на небольшом диапазоне от фонового значения по стволу скважины; на обсадной трубе **T2** было видно, что клей на резьбовых частях нанесли в недостаточном количестве (рис. 3).

При проведении каротажа методом ТК полученные данные между каротажными измерениями менялись. На обсадных трубах **T1–T5** отверстия диаметром от 3 до 10 мм были заметны с малой вероятностью, отверстия диаметром от 1 до 2 мм по кривой не наблюдались и по сравнению с КС в обсадке имели худшую информативность. На обсадной трубе **T2** отсутствие клея было не совсем очевидно (рис. 4).

Выводы для принятия решения о техническом состоянии обсадной колонны по данным КС:

1. При диаметре отверстия больше чем 2 мм имеется 100 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
2. При диаметре отверстия около 2 мм имеется 66 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
3. При диаметре отверстия около 1 мм имеется 17 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
4. Отсутствие клея на резьбовых соединениях обсадных труб имеет 78 % вероятность того, чтобы выставить штрафные санкции.

Выводы для принятия решения о техническом состоянии обсадной колонны по данным ТК:

1. Ни при каком диаметре отверстий нет 100 % вероятности того, что скважина подлежит ликвидации.
2. При диаметре отверстия более 2 мм имеется 55 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
3. При диаметре отверстия менее 3 мм скважина не будет ликвидирована – нет оснований на ликвидацию.
4. Отсутствие клея на резьбовых соединениях обсадных труб имеет 0 % вероятность того, что будут выставлены штрафные санкции.

Наиболее частыми причинами, выявляемыми аномалиями ТК, являются низкое качество обсадных труб и плохая герметизация резьбовых соединений при сооружении скважины. Для окончательного заключения о целостности обсадной колонны необходимо проведение дополнительных исследований с привлечением расходомерии для вновь сооружаемых скважин или индукционного каротажа для скважин, находящихся в эксплуатации длительное время.

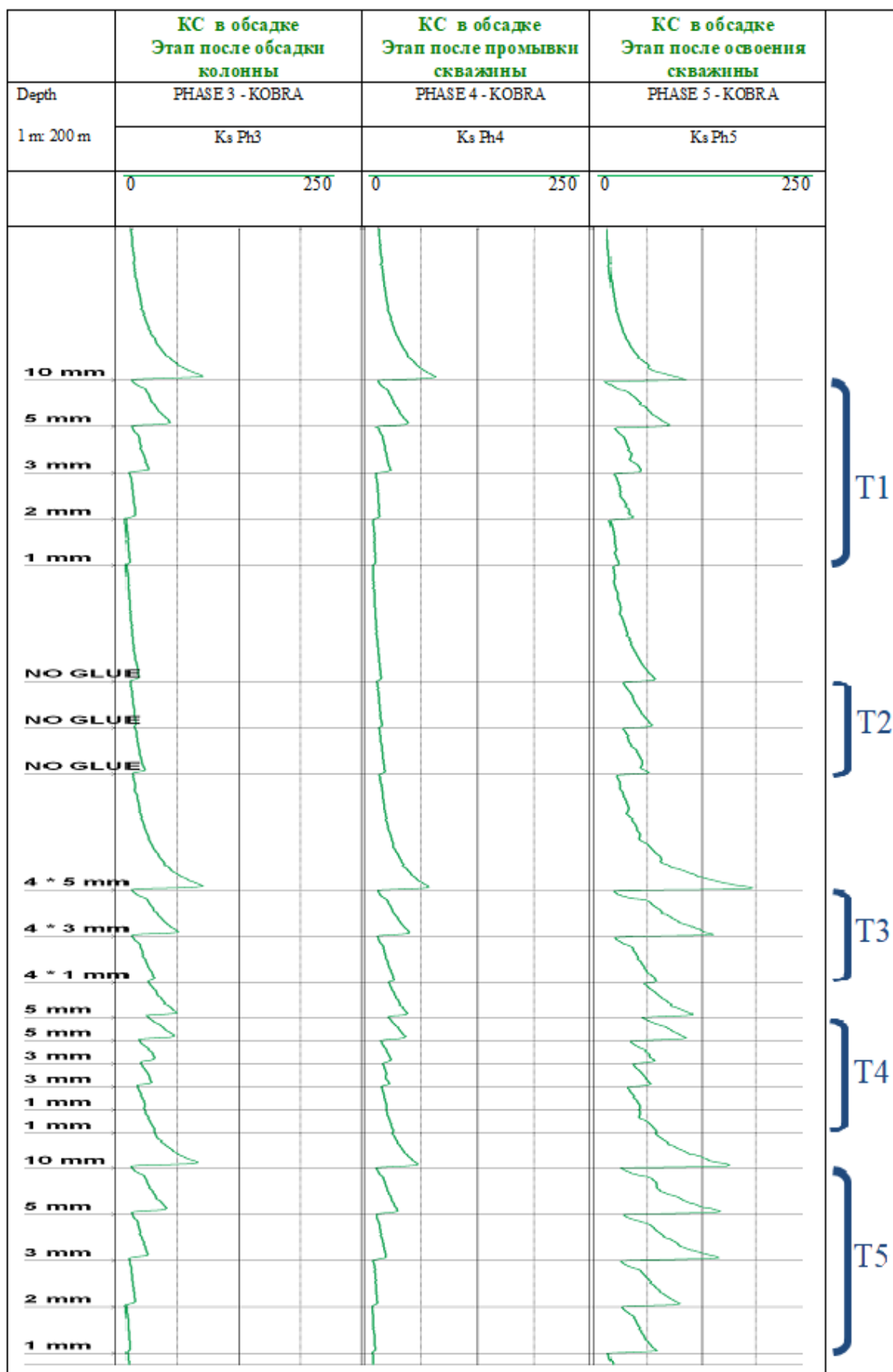


Рис. 3. Кривые каротажа КС в обсадных колонах на разных этапах сооружения скважины

Fig. 3. Electrical resistivity logging curves in the casing at different stages of well construction

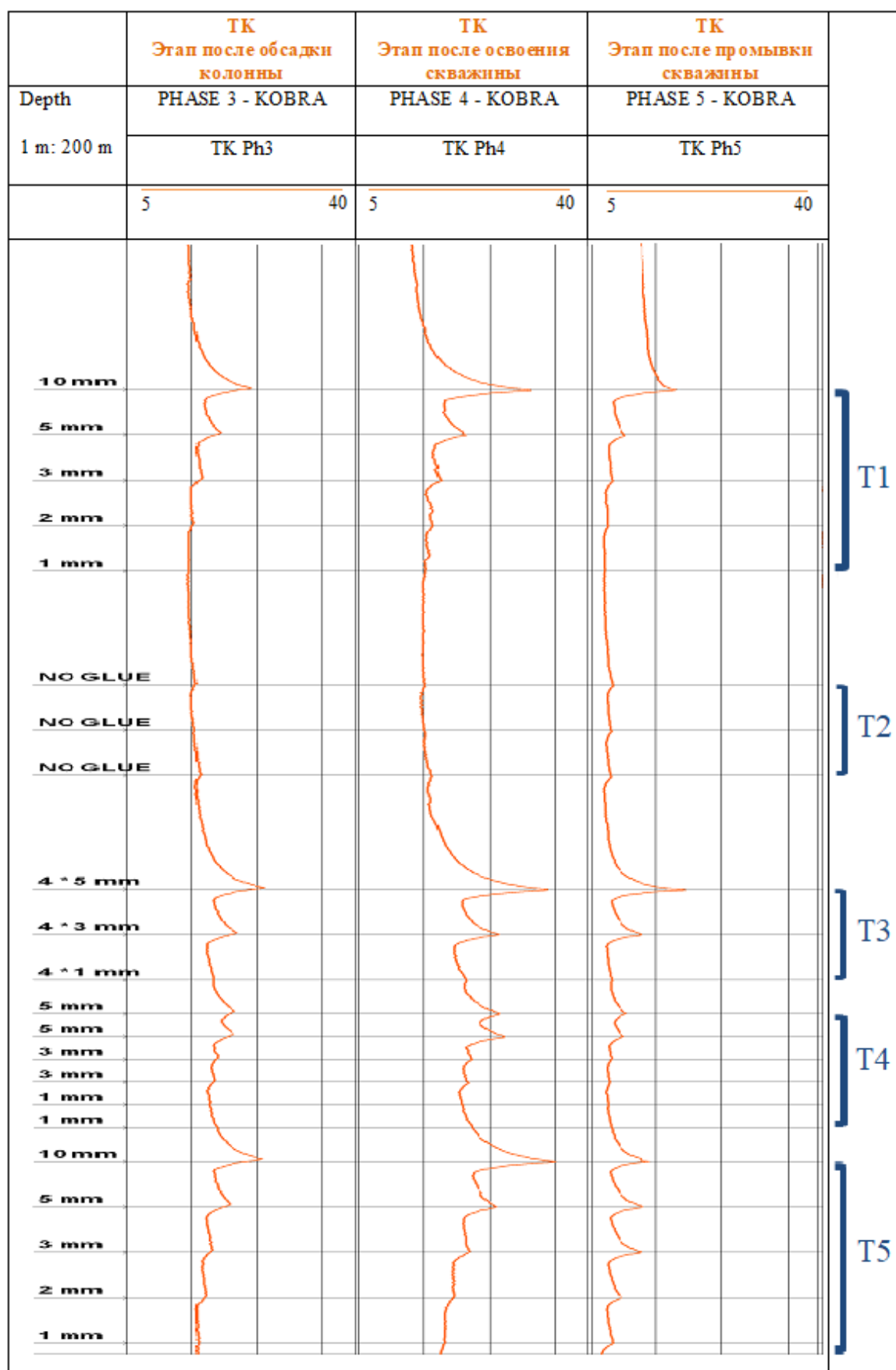


Рис. 4. Кривые каротажа ТК на разных этапах сооружения скважины

Fig. 4. Current logging curves at different stages of well construction

Заключение

В результате проведенных опытных работ в скважине были выявлены заметные преимущества метода КС в обсадке, такие как: детальная оценка качества соединения и герметичности обсадных колонн; повышенная вероятность определения дефектов обсадных колонн, вплоть до отверстий диаметром 1 мм; высокое разрешение по дифференциации диапазонов кривых каротажа, что позволяет более точно определить интервалы дефектов обсадных колонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uranium Production by Country 2023. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/uranium-production-by-country> (дата обращения: 15.06.2023).
2. Полезные ископаемые Казахстана: объяснительная записка к Карте полезных ископаемых Казахстана масштаба 1:1000 000 // под ред. И.И. Никитченко. – Кокшетау: Изд-во Инф.-аналит. центра геологии, 2002. – 188 с.
3. Uranium deposits of the World, Asia / Ed by F.J. Dahlkamp. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 494 p. URL: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-540-78558-3_6 (дата обращения: 15.06.2023).
4. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные) / Н.Н. Петров, Б.Р. Берикболов, Х.Б. Аубакиров, А.Ф. Вершков, В.Ф. Лухтин, В.Н. Плеханов, В.М. Черняков, В.Г. Язиков. 2-е изд. – Алматы: Изд-во «Гылым», 2008. – 320 с.
5. Underground uranium borehole leaching / Ye.S. Oryngozhin, N.A. Yeremin, G.P. Metaxa, Zh.N. Alisheva // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. – V. 4. – № 442. – P. 62–69. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85> (дата обращения: 15.06.2023).
6. Reactive transport modeling during uranium in Situ Leaching (ISL): the effects of ore composition on mining recovery / M.B. Kurmanseiti, M.S. Tungatarova, A. Kaltayev, J.J. Royer // Minerals. – 2022. – V. 12. – P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.3390/min12111340> (дата обращения: 15.06.2023).
7. Study of mining-geological characteristics of uranium deposits of Kazakhstan for development by underground well leaching / Ye.Ye. Oryngozha, A.Ye. Vorobiev, M. Zhalgalieva, I.Zh. Uteshev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences. – 2020. – V. 5. – № 443. – P. 156–164. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.116> (дата обращения: 15.06.2023).
8. Самоочищение продуктивного горизонта на месте проведения двухскважинного опыта по выщелачиванию урана на Добровольном месторождении (Курганская область) / А.В. Сашенко, Г.И. Авдонин, Г.А. Тарханова, М.Д. Носков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 333. – № 5. – С. 137–147. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3422> (дата обращения: 15.06.2023).
9. Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин. 4-е изд., переработ. и дополн. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2014. – 456 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/19295> (дата обращения: 15.06.2023).
10. Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for earth scientists. Reprinted with corrections. – The Netherlands: Springer, 2008. – 699 p. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ellis-dv-singer-jm-well-logging-earth-scientists-2008.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).
11. Chopra P., Papp É., Gibson D. Geophysical well logging. – Canberra: Department of Geology, Australian National University, 2005. – № 1. – P. 105–115. URL: https://www.researchgate.net/publication/228994892_Geophysical_well_logging#fullTextFileContent (дата обращения: 15.06.2023).
12. Бейсекеев Е.Ш., Язиков Е.Г. Моделирование движения жидкостей в процессе эксплуатации скважинного фонда на месторождениях урана, обрабатываемых методом ПСВ // Известия

Вследствие экранных эффектов чувствительность способа измерений по схеме КС значительно выше, чем по электрической цепи ТК, и поэтому является более предпочтительной при промысловой жидкости с высокой минерализацией и большой глубине скважин.

Таким образом, в дальнейших работах по контролю технического состояния скважин (определение герметичности полимерных обсадных колонн) рекомендуется использование метода КС в обсадке в целях увеличения эффективности и качества сооружения скважин.

- Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 73–84. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3637> (дата обращения: 15.06.2023).
13. Методика интерпретации данных ГИС в программном обеспечении GIK при подсчете запасов урана / Ш. Кисеева, Д. Раушанбек, Н.А. Асирбек, А. Шарапатов // Сатпаевские чтения – 2022. Тренды современных научных исследований: Труды международной научно-практической конференции. – Алматы: КазНУ, 2022. – Т. 1. – С. 33–39. URL: <https://official.satbayev.university.ru/materialy-satpaevskikh-cheniy> (дата обращения: 15.06.2023).
 14. Асирбек Н.А. Интерпретация данных КНД-м с одновременным ГК на урановых месторождениях гидрогенного типа // Актуальные проблемы урановой промышленности: сборник трудов X юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию АО «НАК «Казатомпром» и 20-летию ТОО «Институт высоких технологий». – Алматы: КБТУ, 2022. – Т. 1. – С. 136–139. URL: <https://uranconference.kz> (дата обращения: 15.06.2023).
 15. Легавко А.В., Легавко Д.А. Новое программное обеспечение каротажа мгновенных нейтронов деления с аппаратно-методическим комплексом АМК КНД-М АИНК-49 // Геофизические исследования. – 2022. – Т. 23. – № 3. – С. 35–47. URL: <https://doi.org/10.21455/gr2022.3-3> (дата обращения: 15.06.2023).
 16. Mishunina A.S., Mekh A.A., Yazikov E.G. The effect of drilling waste on water resources – The elemental composition of waste // Key Engineering Materials – KEM. – 2017. – V. 743. – P. 338–341. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.338> (дата обращения: 15.06.2023).
 17. Lavrov A. Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: current status, challenges, and knowledge gaps // Engineering Geology. – 2023. – V. 321. – P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107166> (дата обращения: 15.06.2023).
 18. Study on the model and law for radial leakage of drilling fluid in fractured formations / Shubo Bi, Yan Zhang, Zhi Zhou, Yishan Lou, Rui Zhou, Ximin Zhang // ACS Omega. – 2022. – V. 7. – № 44. – P. 39840–39847. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03895> (дата обращения: 15.06.2023).
 19. Sharapatov A., Shayakhmet M. Physico-geological basis of efficiency of application of aeromagnetic method in oil-gas Caspian lowland // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. – V. 3. – № 423. – P. 95–99. URL: <http://www.geolog-technical.kz/images/pdf/g20173/9599.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).
 20. Sharapatov A., Taikulakov E.E., Assirbek N.A. Geophysical methods capabilities in prospect evaluation and detection of copper-bearing localizations of western Pre-Balkhash // News of the National academy of sciences of the Republic Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2020. – V. 3. – № 441. – P. 72–78. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.56> (дата обращения: 15.06.2023).

Поступила: 19.07.2023 г.

Прошла рецензирование: 26.07.2023 г.

Информация об авторах

Шарапатов А., кандидат геолого-минералогических наук, ассоциированный профессор кафедры геофизики Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

Асирбек Н.А., докторант кафедры геофизики Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

Саманбетов Н.З., магистрант кафедры геофизики Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

UDC 553.495:550.832.7:622.245.01

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ELECTRIC LOGGING METHODS WHEN STUDYING TIGHTNESS OF CASING STRINGS IN WELLS OF URANIUM DEPOSITS

Abish Sharapatov¹,
a.sharapatov@satbayev.university

Nazerke Assirbek¹,
n.assirbek@stud.satbayev.university

Nurlan Samanbetov¹,
n.samanbetov@stud.satbayev.university

¹ Satbayev University,
22, Satbayev street, Almaty, A15M8C4 (050013), Kazakhstan.

The relevance. When exploiting uranium deposits using the method of in-situ leaching, many problematic issues arise. Among them, it is possible to distinguish a violation of the integrity and tightness of the polymer casing, which leads to leakage of solutions due to defects and threaded connections, colmatation, etc. With the help of geophysical wells surveys, namely current logging and resistivity logging, there is a technological possibility of obtaining actual data on the leakage of solutions into the near-wellbore space (their location, size). The distribution of solutions in the annulus lead to technological and environmental violations during the development of deposits.

The main aim: comparative evaluation of the effectiveness of current logging and resistivity logging in solving technological problems – assessment of the integrity of polymer pipes and tightness of threaded connections in the casing of uranium wells and determination of the parameters of liquidation of wells with damaged columns based on the data of current logging or resistivity logging in the casing.

Objects: artificial defects in the casing for experimental work: holes in pipes with different diameters and locations, leaky connections of casing pipes.

Methods. The work was carried out at one of the sites of the Shu-Sarysu province uranium deposit and includes the following activities: preparation of polymer casing strings for the experiment; physical and technical justification of using geophysical wells surveys methods to study the problem; performing measurement work by current logging and resistivity logging methods; performing computational work using current logging, resistivity logging readings and obtaining values of a probabilistic parameter for evaluation of the state of the casing strings and the decision on the operation of wells; comparative analysis and drawing conclusions on the informativeness of borehole geophysical (electrical) methods.

Research results showed that the resistivity logging method is optimal to solve the problem of monitoring the technical condition of casing strings. The conclusions of the research are based on the analysis of the nature of changes in the diagrams of the electrical methods of current logging and resistivity logging, the sensitivity of the measured values of the electric field to defects in the casing. The quantitative values of the parameter % ANO – the amount of current leakage (anomalies), obtained by calculation according to current logging and resistivity logging data, are probabilistic in nature. They made it possible to develop recommendations for making technological and/or managerial decisions on the condition of casing strings and the further use of production wells with various defects in them.

Key words:

Uranium deposits, integrity and tightness of casing strings, polymer pipes, current logging, resistivity logging, optimal logging method.

REFERENCES

1. *Uranium Production by Country 2023*. Available at: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/uranium-production-by-country> (accessed 15 June 2023).
2. *Poleznye iskopayemye Kazakhstan: poyasnitelnaya zapiska k Karte poleznykh iskopayemykh Kazakhstana mashtaba 1:1000000* [Mineral resources of Kazakhstan. Explanatory note for the Map of the mineral resources of Kazakhstan, 1:1000 000 scale]. Ed. by I.I. Nikitchenko. Kokshetau, Information and Analytical Center of Geology Publ. House, 2002. 188 p.
3. *Uranium deposits of the World, Asia*. Ed. by F.J. Dahlkamp. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 494 p. Available at: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-540-78558-3_6 (accessed 15 June 2023).
4. Petrov N.N., Berikbolov B.R., Aubakirov Kh.B., Vershkov A.F., Lukhtin V.F., Plekhanov V.N., Chernyakov V.M., Yazikov V.G. *Uranovye mestorozhdeniya Kazakhstana (ekzogennyye)* [Uranium deposits of Kazakhstan (exogenous)]. 2nd ed. Almaty, Gylm Publ. House, 2008. 320 p.
5. Oryngozhin Ye.S., Yeremin N.A., Metakha G.P., Alisheva Zh.N. Underground uranium borehole leaching. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, vol. 4, no. 442 (2020), pp. 62–69. Available at: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85> (accessed 15 June 2023).
6. Kurmanseit M.B., Tungatarova M.S., Kaltayev, A., Royer J.-J. Reactive transport modeling during uranium in Situ Leaching (ISL): the effects of ore composition on mining recovery. *Minerals*, 2022, no. 12 (11), pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.3390/min12111340> (accessed 15 June 2023).
7. Oryngozha Ye.Ye., Vorobiev A.Ye., Zhangalieva M., Uteshev I.Zh. Study of mining-geological characteristics of uranium deposits of Kazakhstan for development by underground well leaching. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences*, 2020, vol. 5, no. 443, pp. 156–164. Available at: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.116> (accessed 15 June 2023).
8. Sashchenko A.V., Avdonin G.I., Tarkhanova G.A., Noskov M.D. Self-purification of the productive horizon at the site of the two-hole in situ leaching experiment at the Dobrovolnoe uranium deposit (Kurgan region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 137–147. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3422> (accessed 15 June 2023).
9. Skovorodnikov I.G. *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin* [Geophysical surveys of wells]. 4th ed., revised and added. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2014. 456 p. Available at: <https://www.geokniga.org/books/19295> (accessed 15 June 2023).
10. Ellis D.V., Singer J.M. *Well logging for earth scientists*. Reprinted with corrections. The Netherlands, Springer, 2008. 699 p.

- Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ellis-dv-singer-jm-well-logging-earth-scientists-2008.pdf> (accessed 15 June 2023).
11. Chopra P., Papp É., Gibson D. *Geophysical well logging*. Canberra, Department of Geology, Australian National University, January 2005. pp. 105–115. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228994892_Geophysical_well_logging#fullTextFileContent (accessed 15 June 2023).
 12. Beisekeyev Y.Sh., Yazikov E.G. Simulation of liquid movement while well fund operation in uranium deposits produced by ISL method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 73–84. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3637> (accessed 15 June 2023).
 13. Kiseyeva Sh., Raushanbek D., Assirbek N.A., Sharapatov A. Metodika obrabotki dannykh GIS v programnom analize GIK pri podschete zapasov urana [The method of interpretation of GWL data in GIK software when calculating uranium reserves]. *Saptaevskie chteniya – 2022. Trendy sovremennykh nauchnykh issledovaniy. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the international scientific and practical conference. Satbayev conference – 2022. Trends in modern scientific research]. Almaty, Satbayev University, 12 April 2022. Vol. I, pp. 33–39. Available at: <https://official.satbayev.university/ru/materialy-saptaevskikh-cheniy> (accessed 15 June 2023).
 14. Assirbek N.A. Interpretatsiya dannykh KND-m s odnovremennym ispolzovaniyem GK po uranovym mestorozhdeniyam gidrogegnnogo tipa [Interpretation of data of Neutron Fission Logging with simultaneous gamma ray logging in hydrogen type uranium deposits]. *Aktualnye problemy uranovoy promyshlennosti. Sbornik trudov X yubileyoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 25-letiyu AO «NAK «Kazatoprom» i 20-letiyu TOO «Institut vysokikh tekhnologiy»* [Actual problems of the uranium industry: a collection of proceedings of the X anniversary International Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of NAC Kazatoprom and the 20th anniversary of the Institute of High Technologies LLP]. P. 1. Almaty, KBTU, November 24–26, 2022. pp. 136–139. Available at: <https://uranconference.kz> (accessed 15 June 2023).
 15. Legavko A.V., Legavko D.A. Novoe programnoe obespechenie karotazha budushchikh neytronov deleniya s apparaturno-metodicheskimi kompleksami AMK KND-M AINK-49 [New software for prompt fission neutron logging with hardware-methodical complex AMC KND-M AINK-49]. *Geophysical research*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 35–47. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.21455/gr2022.3-3> (accessed 15 June 2023).
 16. Mishunina A.S., Mekh A.A., Yazikov E.G. The effect of drilling waste on water resources - The elemental composition of waste. *Key Engineering Materials KEM*, 2017, vol. 743. pp. 338–341. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.338> (accessed 15 June 2023).
 17. Lavrov A. Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: current status, challenges, and knowledge gaps. *Engineering Geology*, 2023, vol. 321, pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107166> (accessed 15 June 2023).
 18. Shubo Bi, Yan Zhang, Zhi Zhou, Yishan Lou, Rui Zhou, Ximin Zhang. Study on the model and law for radial leakage of drilling fluid in fractured formations. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 44, pp. 39840–39847. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03895> (accessed 15 June 2023).
 19. Sharapatov A., Shayakhmet M. Fiziko-geologicheskie osnovy effektivnosti primeneniya aeromagnitnogo metoda v neftegazonnoy Prikaspiyskoy nizmennosti [Physico-geological basis of efficiency of application of aeromagnetic method in oil-gas caspian lowland]. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2017, vol. 3, no. 423, pp. 95–99. In Rus. Available at: <http://www.geolog-technical.kz/images/pdf/g20173/9599.pdf> (accessed 15 June 2023).
 20. Sharapatov A., Taikulakov E.E., Assirbek N.A. Geophysical methods capabilities in prospect evaluation and detection of copper-bearing localizations of western Pre-Balkhash. *News of the National academy of sciences of the Republic Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2020, vol. 3, no. 441. pp. 72–78. Available at: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.56> (accessed 15 June 2023).

Received: 19 July 2023.

Reviewed: 26 July 2023.

Information about the authors

Abish Sharapatov, Cand. Sc., associate professor, Satbayev University.

Nazerke Assirbek, doctoral student, Satbayev University.

Nurlan Samanbetov, undergraduate, Satbayev University.